

УДК 621.01

А.М. Поляков, доцент, канд. техн. наук,

В.Б. Лазарев, старший преподаватель,

В.И. Пахалюк, доцент, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Российская Федерация, 299053

E-mail: apolyakov.mail@gmail.com

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ С МЕХАНИЧЕСКИМИ ПОДСИСТЕМАМИ В ВИДЕ ПРОСТЕЙШИХ МЕХАНИЗМОВ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ФУНКЦИЯМИ ПОЛОЖЕНИЯ

Исследованы решения обратных задач кинематики мехатронных систем с механическими подсистемами в виде простейших стержневых механизмов: кривошипно-ползунного и ползунко-коромыслового. Полученные решения реализованы и исследованы на реальных мехатронных устройствах при различных законах движения исполнительного органа. Показано, что сложные законы движения могут быть реализованы в мехатронных системах с механическими подсистемами в виде простейших механизмов.

Ключевые слова: *мехатронная система, механическая подсистема, механизм, кинематическая передаточная функция, обратная задача кинематики.*

Развитие и массовое внедрение в практику мехатронной техники позволяет во многих случаях отказаться от классической концепции синтеза механизмов, как механических систем со строго определенными передаточными функциями. Способность мехатронной системы, включающей в себя подсистему интеллектуального управления, к самоорганизации, позволяет использовать в ней механизмы простейшей структуры [1], функции положения которых могут существенно отличаться от требуемых законов движения исполнительных органов. В принципе, типовые мехатронные модули (в том числе, включающие встроенные механизмы с постоянными передаточными отношениями: зубчатые, ременные и т.д.) способны самостоятельно реализовать множество функций, которые в традиционных устройствах доступны только многозвенным механизмам с развитой структурой. Комбинация многозвенных механизмов с мехатронными модулями позволяет решать множество новых технических задач, способствует практической реализации оригинальных конструкторских решений и созданию уникальных технических систем, в том числе, со многими степенями свободы.

Пользуясь терминологией системного анализа, в соответствии с которой “система представляет собой совокупность компонент, подчиненных определенному отношению, зависимости или закономерности и действующих как единое целое” [2], мехатронной можно считать систему, объединяющую в целостный объект совокупность механических, электронных и управляющих устройств, образующих синергетическое единство. Мехатронная система – это упорядоченное множество динамично связанных между собой подсистем, функционирование которых в пространстве и времени подчинено единой цели. Важно отметить, что синергетическое объединение подсистем в мехатронную систему приводит к приобретению ими новых качественных особенностей, которые исчезают после декомпозиции системы. Это одна из наиболее характерных особенностей мехатронных систем, которая отличает их от большинства других, полученных путем механического объединения разнородных подсистем [1].

Механизмы, входящие как подсистемы в мехатронные системы, обладают новыми качественными особенностями по отношению к механизмам, работающим в составе традиционных технических систем. Эти особенности исчезают, как только механизм рассматривается как независимо функционирующая механическая система.

Одно из основных качественных отличий механизмов мехатронных систем состоит в том, что их структура не оказывает решающего влияния на кинематику. С одной стороны, одинаковые (даже достаточно сложные) законы движения исполнительных органов могут быть получены с помощью множества механизмов, имеющих существенно различающиеся структуры, с другой – с помощью одного и того же механизма могут быть реализованы существенно отличающиеся друг от друга законы. Этим, в первую очередь, и объясняется желание использовать в мехатронных системах простейшие механизмы. Такой подход приемлем как для передаточных, так и для направляющих механизмов. Задачи их синтеза в этом случае не противоречат классическим [3, 4], но существенно расширяется множество оцениваемых вариантов при выборе оптимального решения.

Целью данной работы является обоснование использования простейших механизмов в мехатронных устройствах, реализующих сложные законы движения исполнительных органов.

С начала возникновения и до настоящего времени механизмы, как носители механических движений в машинах, используются, в основном, для преобразования усилий либо для реализации

требуемых движений. Но так как преобразование усилий в механических системах всегда сопровождается преобразованием движений, то все их возможные варианты, по существу, создаются для одних и тех же целей, связанных именно с преобразованием движений. В этом смысле механизмы можно рассматривать как некоторые “рычаги”, характеризующиеся в произвольных возможных конфигурациях определенными передаточными функциями: силовыми или кинематическими, как “рычаги” с переменными, в общем случае, передаточными отношениями. Такие функции могут быть весьма сложными и реализовать их с помощью простых механизмов в большинстве случаев, как правило, не удается. В связи с этим и было создано множество самых разнообразных конструкций механизмов с развитой кинематической структурой.

Одна из главных задач при создании новых технических устройств состоит в реализации требуемых законов движения исполнительных органов. В процессе ее решения конструктор на первичном этапе выбирает механизм подходящей структуры из множества известных либо решает задачу структурного синтеза [5]. На следующем этапе производится метрический (кинематический) синтез механизма.

Метрический синтез представляет собой сложную задачу, как с математической, так и с технической точек зрения, которую часто решают методом последовательных приближений, одновременно используя методы структурного и кинематического анализа. При этом всегда учитывается тот факт, что произвольная передаточная функция не может быть точно реализована даже с помощью механизма, имеющего сложную структуру [6]. Поэтому на практике создаются механизмы, реализующие лишь более или менее точно требуемую передаточную функцию при минимально возможном числе звеньев или структурных групп, образуемых ими.

Функцией положения или, по-другому, кинематической передаточной функцией механизма нулевого порядка в механизмах с одной степенью свободы называется зависимость между обобщенными (угловыми или линейными) координатами выходного ψ и входного ϕ звеньев [7]:

$$\psi = f(\phi). \quad (1)$$

Дифференцируя (1) дважды по ϕ , получим кинематические передаточные функции первого ψ' и второго ψ'' порядка, соответственно: $\psi' = \frac{d\psi}{d\phi}$, $\psi'' = \frac{d^2\psi}{d\phi^2}$.

Кинематические передаточные функции не зависят от закона движения входного звена и являются собственными характеристиками механизма [7].

Обобщенную скорость $\dot{\psi}$ и обобщенное ускорение $\ddot{\psi}$ выходного звена (исполнительного органа механизма) получим с учетом того, что $\phi = \phi(t)$ является функцией времени:

$$\dot{\psi} = \frac{d\psi}{d\phi} \frac{d\phi}{dt} = \psi' \dot{\phi}, \quad \ddot{\psi} = \frac{d^2\psi}{d\phi^2} \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 + \frac{d\psi}{d\phi} \frac{d^2\phi}{dt^2} = \psi'' \dot{\phi}^2 + \psi' \ddot{\phi}. \quad (2)$$

При синтезе механизма как подсистемы мехатронной системы способность реализации им требуемой передаточной функции не является определяющей. Одним из наиболее важных критериев качества в этом случае является непрерывность решения обратной задачи кинематики, определяющая его управляемость при реализации требуемого движения исполнительного органа. Необходимыми условиями получения непрерывной функции являются непрерывность требуемого закона движения исполнительного органа на области его определения и отсутствие сингулярных конфигураций механизма при реализации этого закона.

Так, например, известно, что простейший дезаксиальный кривошипно-ползунный механизм при надлежащем выборе его кинематических параметров не будет иметь сингулярных конфигураций при полнооборотном движении кривошипа. Следовательно, если требуемый закон движения его исполнительного органа (ползуна) непрерывный, то решение обратной задачи кинематики будет также непрерывным и единственным. Покажем на примере, что такое решение может быть получено, например, для достаточно сложного непрерывного закона движения.

Как правило, в функциональных механизмах, в которых положения исполнительного органа регламентируются для каждого момента времени, задаются требуемым законом движения $\psi = \psi(t)$, а обобщенные скорость и ускорение (2) получают путем их дифференцирования по времени. В циклических же позиционных механизмах, предназначенных, главным образом, для перевода исполнительного органа из одного крайнего положения в другое и обратно, задается обобщенное ускорение, а другие передаточные функции получают путем интегрирования (2) с учетом требуемых условий движения в начале и конце цикла. В рассматриваемом примере будем считать мехатронную систему функциональной, задавая закон движения ее исполнительного органа в виде $\psi = \psi(t)$.

Рассмотрим мехатронную систему, включающую в себя шаговый двигатель EMMS-ST-87-M-SEB Festo, оснащенный встроенным редуктором, соединенный с входным звеном (кривошипом) кривошипно-ползунного механизма. Подсистема управления функционирует под управлением персонального

компьютера с архитектурой AMD 64 и включает в себя программируемый промышленный контроллер с программным обеспечением CoDeSys 2.3 SoftMotion, поддерживающим стандарт PLCOpen, программно-логический контроллер Festo и контроллер с архитектурой ARM Cortex-M3. Она предназначена для контроля состояния и обеспечения требуемого закона движения исполнительного органа. Размеры звеньев механизма следующие: длина кривошипа $l_1 = 0.1$ м длина шатуна $l_2 = 0.4$ м; линия движения ползуна смещена относительно оси вращения кривошипа на расстояние $a = 0.05$ м. Обозначим: φ_1 – угол поворота кривошипа; s – координата оси вращения шатуна относительно ползуна.

При данных значениях кинематических параметров функция положения механизма имеет вид:

$$s(\varphi_1) = 0.1 \cos \varphi_1 + 0.05 \sqrt{4 \cos^2 \varphi_1 - 4 \sin \varphi_1 + 59}, \quad (3)$$

непрерывна и дважды дифференцируема на отрезке $\varphi_1 \in [0, 2\pi]$.

Приравнявая к нулю первую производную (3) по φ_1 (кинематическую передаточную функцию первого порядка), определим значения $\varphi_{e1} = 2.974$ рад и $\varphi_{e2} = 0.069$ рад обобщенной координаты φ_1 , при которых $s(\varphi_{e1}) = s_{\min} = 0.296$ м и $s(\varphi_{e2}) = s_{\max} = 0.497$ м. Учитывая эти значения, зададим закон движения с выстоем исполнительного органа в крайнем положении:

$$s(t) = \begin{cases} 0.396 - 0.1 \cos(5.24t), & t \leq 0.6 \text{ с} \\ 0.497, & 0.6 < t \leq 0.8 \text{ с} \\ 0.396 + 0.1 \cos(15.71t), & 0.8 < t \leq 1 \text{ с} \end{cases}, \quad (4)$$

Отметим, что такой закон движения практически невозможно реализовать с помощью традиционных многозвенных стержневых механизмов.

Обратную задачу кинематики решим методом последовательных вычислений координат функции положения, принимая на каждом шаге для $t^i = t^{i-1} + \Delta t$ значения $\varphi_1^i = \varphi_1^{i-1} + \Delta \varphi_1$, $i = \overline{1, 100}$ по следующему алгоритму:

$$\varphi_1^0 = 0: \text{ for } i \text{ from } 1 \text{ to } 100 \text{ do } \Delta \varphi := \text{fsolve}(s(\varphi) - s(t), \Delta \varphi = 0); \varphi_1[i] := \varphi_1[i-1] + \Delta \varphi; \text{ end}.$$

Такой алгоритм позволяет надежно вычислять значения нелинейной функции $\varphi_1 = \varphi_1(t)$ на каждом шаге в окрестности $\Delta \varphi = 0$.

На рисунке 1 показан результат решения обратной задачи кинематики – график функции $\varphi_1 = \varphi_1(t)$.

После интерполяции кубическими сплайнами на промежутках возрастания, получим аналитическое представление функции $\varphi_1 = \varphi_1(t)$. Подставив ее в (3), получим функцию $s^* = s^*(t)$, которая, вследствие численного решения обратной задачи кинематики, приближенно соответствует (4). Дважды дифференцируя s^* по времени, получим скорость v^* и ускорение w^* исполнительного органа. В графической форме эти функции показаны на рисунке 2.

Отметим, что для заданной мехатронной системы может быть получено точное аналитическое решение обратной задачи кинематики, но для систем с механизмами более сложной структуры такие решения могут оказаться громоздкими или же их можно получить только с использованием численных методов. При решении большинства практических задач точное решение задачи и не требуется, так как реальное движение исполнительного органа всегда реализуется приближенно.

Полученное решение проверено экспериментально на реальном мехатронном устройстве, краткое описание которого приведено ранее. Эксперименты проводились при различных усилиях, которые прикладывались к исполнительному органу. Установлено, что при относительно малых мощностях (меньших, чем паспортная мощность шагового двигателя) система управления практически точно отрабатывает заданный закон движения при мощностях, сравнимых с паспортной мощностью, при больших – заданный закон движения отрабатывается приближенно с заметными погрешностями.

В качестве второго примера рассмотрим реальную мехатронную систему с механизмом той же структуры, что и в первом примере, но входным звеном которого является ползун электромеханической

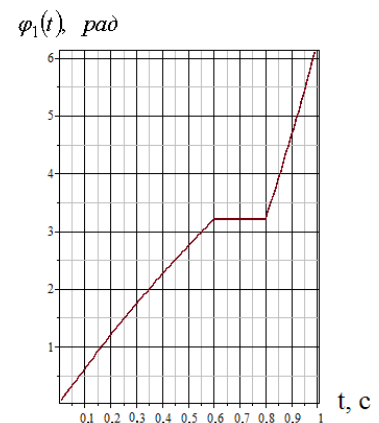


Рисунок 1 – График функции $\varphi_1 = \varphi_1(t)$, соответствующий заданному закону движения исполнительного органа мехатронной системы

оси EGC-185-100-TB-KF-50H-GK-ZUB-2MY2X Festo. Эта система использована в действующем мехатронном моделирующем устройстве для испытаний на износ элементов тотальных эндопротезов тазобедренного сустава, разработанном в лаборатории биомеханики СевНТУ. Ее трехмерная модель и расчетная схема показаны на рисунках 3, а и 3, б, соответственно, а требуемый в соответствии с ISO/DIS 18192-1 закон движения исполнительного органа, на рисунке 3, в.

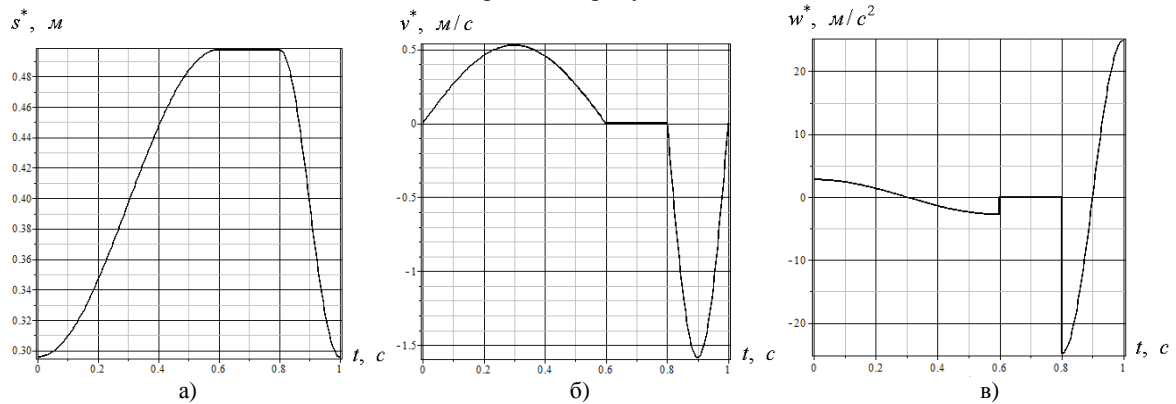


Рисунок 2 – Графики функций: а) $s^* = s^*(t)$; б) $v^* = v^*(t)$; в) $w^* = w^*(t)$

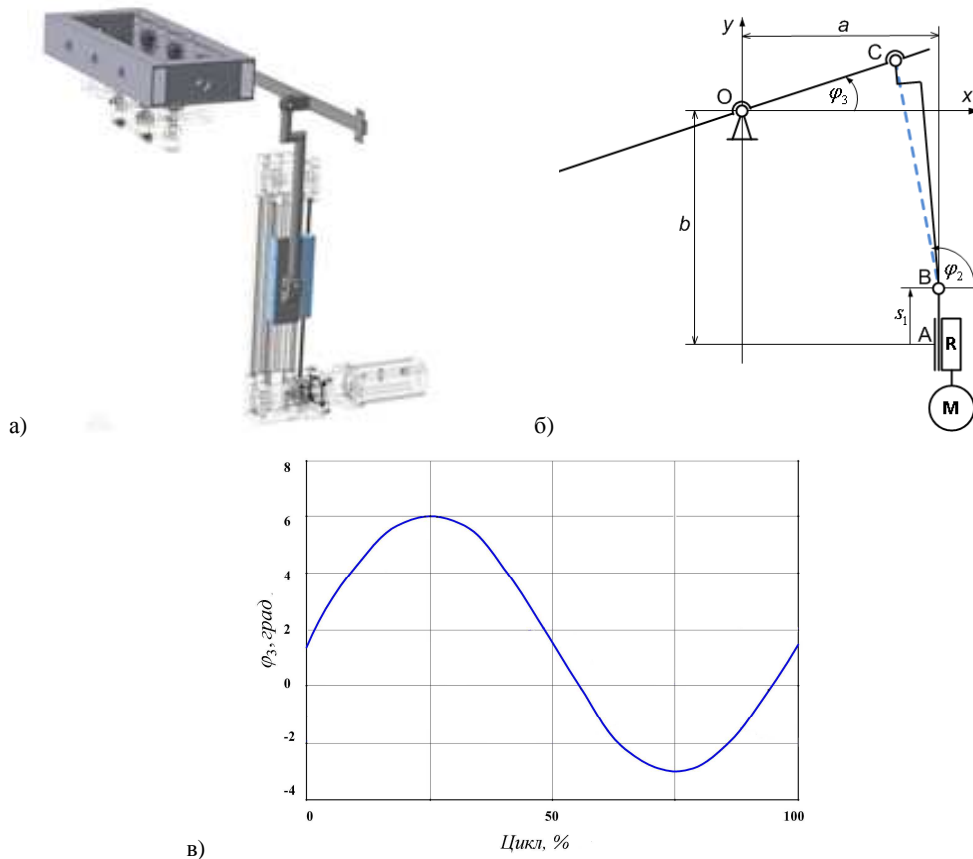


Рисунок 3 – Привод каретки моделирующего устройства для испытаний на износ элементов тотальных эндопротезов тазобедренного сустава: а) трехмерная модель; б) расчетная схема; в) график функции φ_3 , регламентированный ISO/DIS 18192-1

Аналитическое решение обратной задачи кинематики имеет вид

$$s_1 = b + l_{OC} \sin \varphi_3 + \sqrt{l_{BC}^2 - a^2 + 2al_{OC} \cos \varphi_3 - l_{OC}^2 \cos^2 \varphi_3}, \quad (5)$$

где $\varphi_3 = \varphi_3(t)$.

На этапе конструирования моделирующего устройства и метрического синтеза механизма его кинематические параметры были подобраны так, что функция положения $\varphi_3 = f(s_1)$ при всех s_1 , обеспечиваемых выбранной электромеханической осью непрерывна, а функция (5) является очень

близкой к линейной на отрезке $\varphi_3 \in [\varphi_{3\min}, \varphi_{3\max}]$. При этом другие требования к реализуемой функции положения не учитывались.

ISO/DIS 18192-1 регламентирует испытания эндопротезов с частотой 1 Гц. При частотах близких к 1 Гц и реальных инерционно-массовых характеристиках устройства электромеханическая ось EGC-185-100-TV-KF-50H-GK-ZUB-2MY2X практически точно обрабатывает требуемый закон движения. При больших частотах наблюдаются заметные погрешности.

Тестирование рассматриваемой в этом примере системы и моделирующего устройства в целом производилось также путем реализации различных законов движения.

На рисунке 4 показано окно GUI CAM редактора программы SoftMotion в CoDeSys, в котором задавался требуемый закон движения входного звена. В качестве иллюстрации здесь показан закон движения ползуна электромеханической оси с выстоем в одном из крайних положений.

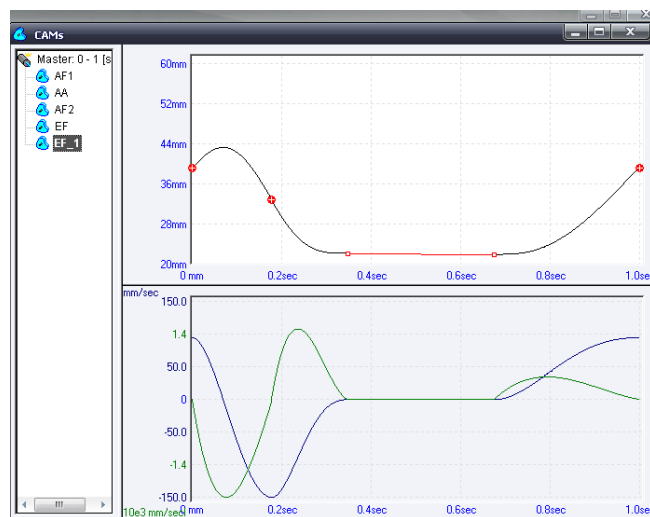


Рисунок 4 – Окно GUI CAM редактора программы SoftMotion в CoDeSys

На рисунке 5 показана динамика процесса реализации такого закона движения. Видно, что при заданных условиях реальный закон движения ползуна электромеханической оси практически совпадает с требуемым.

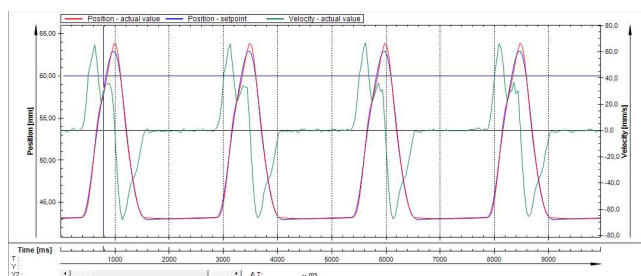


Рисунок 5 – Динамика процесса движения ползуна электромеханической оси мехатронной системы привода каретки при реализации закона движения с выстоем в крайнем положении

Необходимо отметить, что встроенная система управления способна достаточно точно отслеживать заданные законы движения только в определенных пределах, ограниченных параметрами электромеханической оси. Так, например, при увеличении скорости (что требует большей мощности) становятся заметными отличия в заданных и реализованных законах движения (рисунок 6).

Анализ результатов тестирования показал, что встроенная система управления позволяет реализовать множество сложных законов движения в пределах возможностей используемой в данной системе электромеханической оси. В качестве примера на рисунке 7 показана динамика процесса движения ползуна по закону с постоянной (на определенном участке) скоростью.

Описанные выше примеры свидетельствуют о том, что с помощью простейших механизмов, как подсистем, входящих в состав мехатронных систем, могут быть реализованы практически любые непрерывные законы движения исполнительных органов. При их синтезе одним из основных условий является обеспечение непрерывности кинематических передаточных функций, что обеспечивается отсутствием возможных сингулярных конфигураций. Кроме этого, желательно выполнить условия

ограничения углов давления в кинематических парах, обеспечить удобство сборки, обслуживания, встраивания в какое-либо техническое устройство, технологический процесс и т.п.

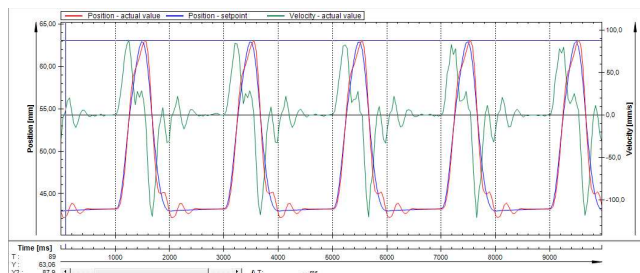


Рисунок 6 – Динамика процесса движения ползуна электромеханической оси мехатронной системы привода каретки с явно выраженным перерегулированием на начальном участке выстоя

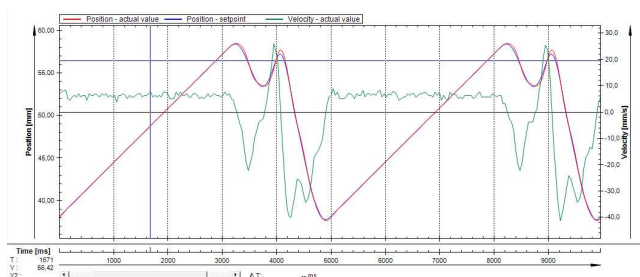


Рисунок 7 – Динамика процесса движения ползуна электромеханической оси мехатронной системы привода каретки при реализации закона с постоянной скоростью

Характер кинематических передаточных функций при этом имеет второстепенное значение. Однако следует отметить, что чем более близка по форме функция положения к закону движения исполнительного органа, тем более качественным может оказаться процесс управления движением. Но это справедливо по отношению именно к конкретному закону и, следовательно, ограничивает функциональные возможности мехатронной системы, в частности, ее способность обеспечивать реализацию различных по характеру законов движения. Кроме того, такой подход к синтезу может потребовать проектирования многосвязного механизма с развитой структурой, что приведет к снижению надежности не только механической подсистемы, но и мехатронной системы в целом. С этой точки зрения наибольшей надежностью будут обладать мехатронные системы, включающие в себя только типовые мехатронные модули. Но это не всегда возможно, так как на практике такие системы чаще всего встраиваются в другие сложные системы, и возникает необходимость обеспечения их совместимости с другими подсистемами. Так, например, может потребоваться передать движение на значительное расстояние, обойти препятствие на пути потока передачи мощности, обеспечить перемещение исполнительного органа на расстояние большее, чем обеспечивается непосредственно типовым модулем и т.д.

При синтезе мехатронных систем необходимо учитывать очевидный факт, состоящий в том, что наибольшая точность при реализации заданных законов движения исполнительных органов достигается при правильном выборе приводных устройств. В противном случае реальные движения будут отличаться от требуемых. Под «правильным выбором» приводного устройства в данном случае следует понимать процесс определения его мощности, необходимой для реализации некоторого экстремального закона движения. Ясно, что такая мехатронная система будет способна реализовывать и законы движения, требующие меньшей мощности.

Еще одно предназначение механизмов – реализация требуемых траекторий движения заданных точек рабочих органов. Такие механизмы, которые принято называть направляющими, также могут быть рассмотрены с точки зрения системного подхода как подсистемы мехатронных систем.

Траектории точек звеньев в пространстве являются функциями координат и возможность их реализации с помощью механизмов с одной степенью свободы определяется не только структурой, но и системой кинематических параметров, обусловленных системами уравнений связей. Как правило, в традиционных механических системах для реализации сложных траекторий используются механизмы с многосвязной структурой. Однако рассматривая их как подсистемы мехатронных систем, можно предположить, что для реализации требуемых траекторий сложной формы более рациональными могут оказаться механизмы последовательной или параллельной структуры с избыточным числом степеней свободы.

Такой подход, например, успешно используется в робототехнике и во многом заимствован у биологических объектов [8, 9]. В частности, как известно, манипуляторы промышленных роботов представляют собой механические системы, предназначенные для воспроизведения движений, подобных движениям руки человека, структуру и другие особенности которой (с многих точек зрения) можно считать оптимальными [10]. Но человек, управляя рукой, способен осуществлять множество движений, в том числе, и не оптимальных. Поэтому ценность руки заключается именно в возможности осуществлять требуемые человеку движения, оптимальные с точки зрения различных критериев качества. Следовательно, руку человека можно считать оптимальной только в качестве подсистемы, функционирующей в составе биомеханической системы – человека, который активно взаимодействует с окружающей средой.

То же можно сказать и о механизмах с избыточным числом степеней свободы (последовательной или параллельной структуры), работающих в составе мехатронных систем. Связывая с помощью пространственно-временных соотношений координаты точки, принадлежащей одному из звеньев механизма с избыточным числом степеней свободы и учитывая возможность синхронизации приводных модулей мехатронной системы, можно реализовать достаточно сложные траектории ее движения. Задачи синтеза таких механизмов уже существенно отличаются от классических и, в большей степени, связаны с удовлетворением различных по своему содержанию критериев качества, в том числе и не кинематического характера.

Дальнейшие исследования в данной области будут посвящены оценкам направляющих мехатронных систем с механическими подсистемами, образуемыми на основе простейших кинематических цепей последовательной или параллельной структуры с избыточным числом степеней свободы, а также решению обратных задач кинематики таких систем.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Подураев Ю.В. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем / Ю.В. Подураев, В.С. Кулешов // Мехатроника. — 2000. — № 1. — С. 5–10.
2. Агошкова Е.Б. Эволюция понятия системы / Е.Б. Агошкова, Б.В. Ахлибинский // Вопросы философии. — 1998. — № 7. — С. 170–179.
3. Артоболевский И.И. Синтез плоских механизмов / И.И. Артоболевский, Н.И. Левитский, С.А. Черкудинов. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1959. — 1084 с.
4. Добровольский В.В. Общая теория механизмов для образования плоских кривых / В.В. Добровольский // Тр. семинара по ТММ. — М., 1950. — Т. 9, №36. — С. 13–77.
5. Пейсах Э.Е. О структурном синтезе рычажных механизмов / Э.Е. Пейсах // Теория механизмов и машин. — 2005. — № 1 (3). — С. 77–80.
6. Чебышев П.Л. Полное собрание сочинений: Теория механизмов. Т. 4. / П.Л. Чебышев. — М.: Изд-во АН СССР, 1948. — 254 с.
7. Левитский Н.И. Колебания в механизмах / Н.И. Левитский. — М.: Наука, 1988. — 336 с.
8. Коренев Г.В. Введение в механику человека / Г.В. Коренев. — М.: Наука, 1977. — 264 с.
9. Смольников Б.А. Проблемы механики и оптимизации роботов / Б.А. Смольников. — М.: Наука, 1991. — 232 с.
10. Кобринский А.А. Манипуляционные системы роботов: Основы устройства, элементы теории / А.А. Кобринский, А.Е. Кобринский // Научные основы робототехники. — М.: Наука, 1985. — 343 с.

Поступила в редакцию 31.03.2014 г.

Поляков О.М., Лазарев В.Б., Пахалиук В.І. Оцінка працездатності мехатронних систем з механічними підсистемами у вигляді найпростіших механізмів з нелінійними функціями положення

Досліджені рішення обернених задач кінематики мехатронних систем з механічними підсистемами у вигляді найпростіших стрижневих механізмів: кривошипно-повзункового й повзунко-коромислового. Отримані рішення реалізовані й досліджені на реальних мехатронних пристроях при різних законах руху виконавчого органа. Показано, що складні закони руху можуть бути реалізовані в мехатронних системах з механічними підсистемами у вигляді найпростіших механізмів.

Ключові слова: мехатронна система, механічна підсистема, механізм, кінематична передатна функція, обернена задача кінематики.

Polyakov A.M., Lazarev V.B., Pakhaliuk V.I. Estimation of work of mechatronic systems with mechanical subsystems in form of elementary mechanisms with nonlinear position functions

Inverse kinematic problems of mechatronic systems with mechanical subsystems in the form of the elementary linkages are investigated. The received solutions are realized and investigated on the real mechatronic devices at various laws of the end-effector movement. It is shown, that complex laws of movement can be realized in mechatronic systems with mechanical subsystems in the form of the elementary mechanisms.

Keywords: mechatronic system, mechanical subsystem, mechanism, kinematic transfer function, inverse kinematic problem.